Philippe POSTH

NAVIGATION ASTRONOMIQUE

et calculatrices programmables

deneb editions

Navigation Astronomique

et calculatrices programmables

Editions DENEB
11, rue des Acacias
31830 PLAISANCE du Touch

Philippe POSTH

Navigation Astronomique

et calculatrices programmables

deneb editions

Sommaire

	Page
1ère Partie : Théorie de la navigation Astronomique et pratique sur Casio fx 180p	1
Introduction	3
Chapitre 1 : Les données de base	5
Petits rappels de géographie	5
Le sextant	10
Chapitre 2 : La droite de hauteur de Soleil	12
Théorie	12
Pratique	16
Grilles de calculs	20
Chapitre 3 : La méridienne	22
La latitude à la méridienne	22
La longitude à la méridienne	24
Chapitre 4 : Etoiles, Lune et planètes	26
Conclusion	28
2ème Partie : Programmes de Navigation Astronomique sur Casio fx-6910aG	31
Présentation des programmes	33
Programme EPHEMERI	34
" SOLEIL	36
" MERIDIEN	38
" ETOILES	40
" POSITION	42
" CALCULS	44
" MODULO	44
Tableaux des étoiles	46

Note Importante : L'usage des informations et programmes contenus dans ce livre se fait sous la seule et entière responsabilité de l'utilisateur.
En particulier, avant toute utilisation "en réel" des programmes, il appartient à l'utilisateur de s'assurer par des tests et des essais répétés que les résultats sont toujours exacts.

1ère Partie :

Théorie de la Navigation Astronomique

et pratique sur calculatrice
Casio Fx 180 p

En guise d'Introduction

Une journée en mer

Monsieur Marin invita un jour son ami, Monsieur Eléphant, à faire un tour au large sur son bateau. Au jour dit, la météo annonçant une magnifique journée sans difficultés, les deux compères appareillèrent au matin et, dès la sortie du port, pointèrent l'étrave droit vers le large.

Derrière eux, la terre s'éloignait petit à petit et la balise blanche qui marquait l'entrée du port n'était plus qu'un point à l'horizon. C'est alors que Monsieur Marin suggéra à Monsieur Eléphant :

- "Si nous faisions un point pour nous situer par rapport à cette balise ?"

Aussitôt dit, aussitôt fait : en deux temps trois mouvements, devant Monsieur Eléphant éberlué, Monsieur Marin, utilisant avec maestria quelques instruments bizarres, finit par poser son crayon verticalement sur un point de la carte en affirmant péremptoirement "Nous sommes là !". Les yeux écarquillés de Monsieur Eléphant en disaient long sur son étonnement et son admiration.

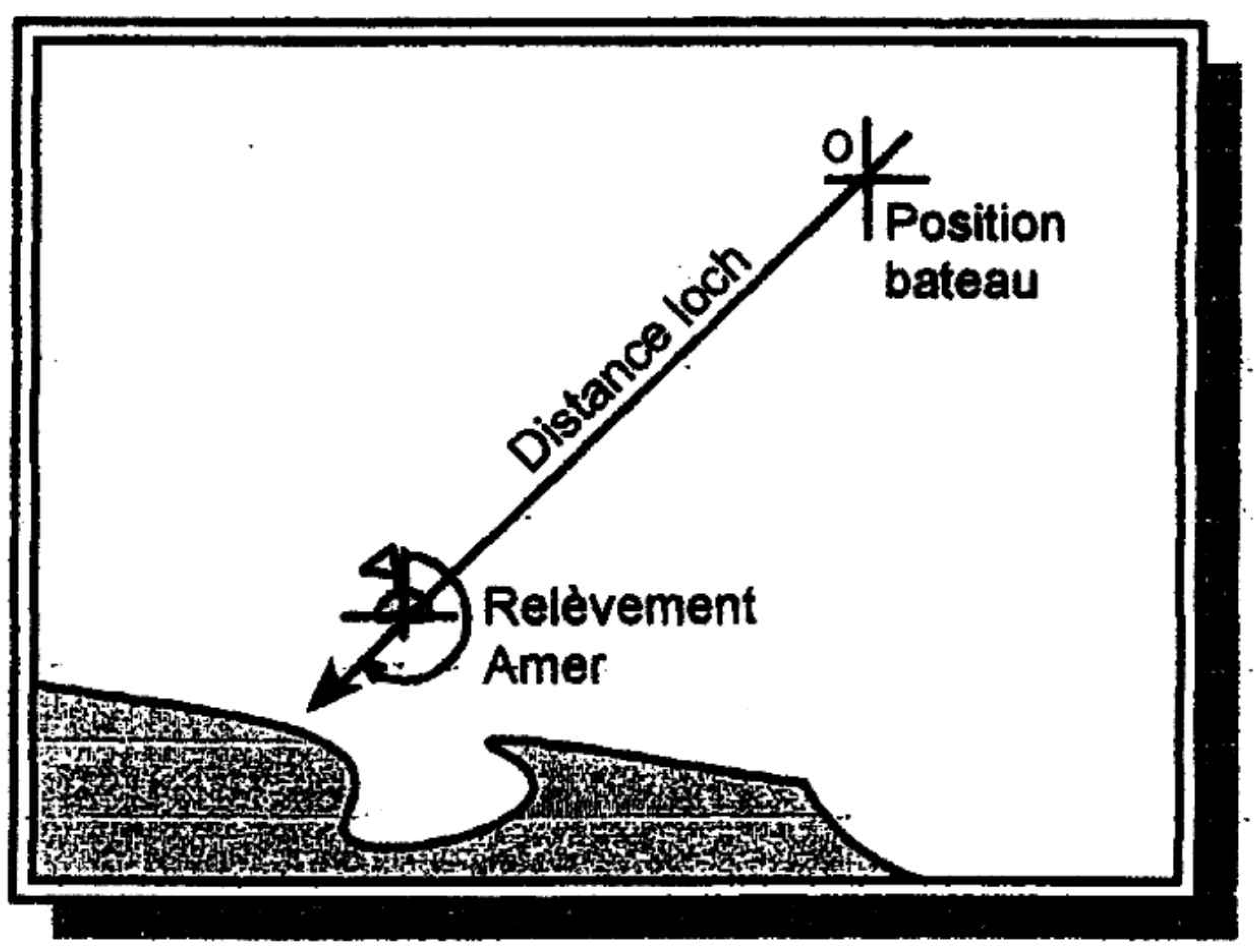
Bon prince, et pas mécontent de montrer sa science, Monsieur Marin expliqua :

- "Oh, c'est simple. La carte me donne la position précise de la balise, je n'ai plus alors besoin que de deux autres éléments pour déterminer ma position :

1 - la direction dans laquelle je vois la balise - elle m'est donnée par mon compas de relèvement ;

2 - la distance qui me sépare de ce point - je la trouve sur mon loch.

Je peux alors, avec ces éléments, tracer mon point sur la carte."



- "Ça alors !, sécria Monsieur Eléphant, Ainsi donc si je connais la position d'un point, il me suffit de déterminer sa direction et sa distance pour me situer par rapport à lui !"
- "Exactement , c'est aussi simple que cela !" répondit Monsieur Marin.

Devant autant de simplicité efficace, Monsieur Eléphant resta bouche bée.

Et les heures passèrent, rythmées par le bruit des vagues autour de l'étrave et des glaçons dans les verres de rosé.

Bientôt, après avoir fait quelques tours et détours sans trop s'occuper du loch, Monsieur Eléphant trouva le temps un peu long et décida de s'occuper.

- "Si nous faisions un nouveau point ?" suggéra-t-il à Monsieur Marin

- "Bonne idée ! répondit le capitaine. Malheureusement, on ne voit plus la balise, il est désormais impossible de se baser sur elle."

- "Ça c'est embêtant, reconnut Monsieur Eléphant. Ce qu'il faudrait, puisqu'on connaît sa position géographique, c'est avoir un autre moyen que le loch pour évaluer la distance qui nous en sépare, et pouvoir aussi déterminer sa direction pour faire le tracé sur la carte.
Ça me paraît vraiment impossible avec cette balise devenue invisible... Avoir un point de repère toujours accessible même au beau milieu de la mer, comme le soleil, quel rêve !..."

Monsieur Marin regarda Monsieur Eléphant du coin de l'oeil :

- "Savez-vous que vous m'étonnez, Monsieur Eléphant ? Vous venez en effet de découvrir les quatre étapes de la Navigation Astronomique :

1 - déterminer la position du "pied" d'un astre (le soleil, par exemple) ,
2 - déterminer la distance qui nous sépare de ce pied,
3 - déterminer la direction dans laquelle se trouve ce pied,
4 - reporter ces éléments sur la carte.

Tenez, poursuivit-il, vous m'avez l'air doué, je vais vous expliquer tout cela en détail, ça va nous occuper un peu..."

Chapitre 1 : Les données de base

La Terre et ses mouvements

① Petits rappels de géographie :

La Terre est une sphère légèrement aplatie aux pôles : son diamètre à l'équateur est de 12.756 km, et aux pôles de 12.713 km. Cette différence est donc très faible et nous la négligerons pour nos calculs. Nous considérerons le globe comme étant une simple sphère.
Le Soleil est une étoile de 1.392.000 km de diamètre située en moyenne à 150 millions de km de la Terre. Si l'on ramenait la terre à un globe de 30 cm de diamètre, le soleil serait une boule de 30 m de diamètre, située à 3 kilomètres.
Pour nos explications, nous considérerons le soleil comme situé à l'infini, et tous ses rayons comme parallèles.
L'axe de rotation de la Terre (qui passe par les pôles) est incliné de 23°26' par rapport au plan de l'orbite (écliptique).

Pour se positionner sur la surface du globe, les marins utilisent un "quadrillage" conventionnel qui apparaît sur nos cartes marines. Les lignes horizontales sont des portions de cercles parallèles à l'équateur. Ce sont les **parallèles** qui nous situent en **latitude,** comptée de 0° (à l'équateur) à 90° (aux pôles), Nord ou Sud selon l'hémisphère.
Perpendiculaires aux parallèles et donc verticaux sur nos cartes, les **méridiens** sont les cercles passant par les pôles. Ils déterminent la **longitude** comptée à partir d'un méridien origine conventionnel, celui de Greenwich, et mesurée de 0° à 180° à l'Est ou à l'Ouest de Greenwich.

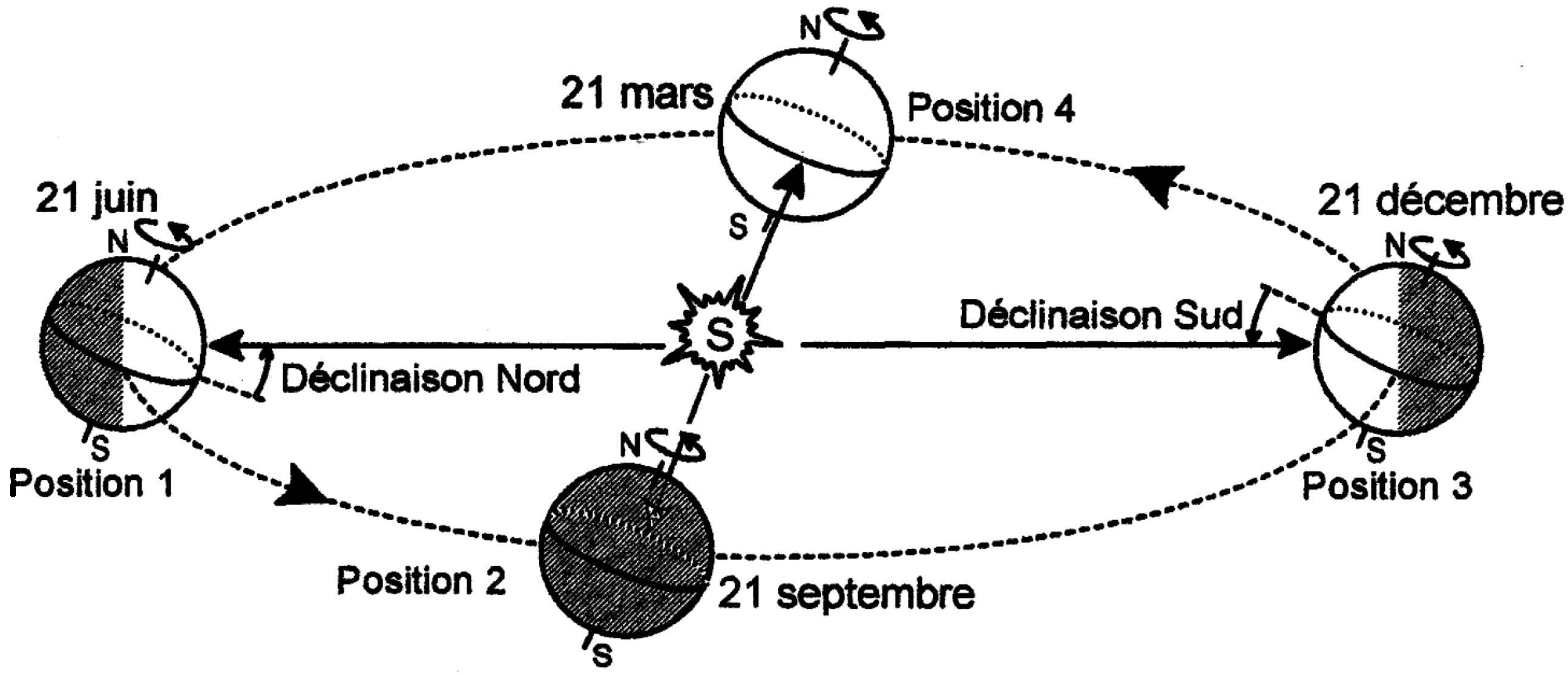
Les géographes de la Révolution de 1791 chargés d'inventer les unités de mesure du nouveau système décimal avaient choisi d'établir comme étalon de longueur la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre et d'appeler "mètre" l'unité ainsi définie. La circonférence de la terre par les pôles s'est donc trouvée à posteriori mesurer exactement 40 millions de mètres, soit 40.000 km. Cette mesure a été plus tard corrigée en utilisant des moyens modernes de topologie, mais le mètre est resté.
Les marins, quant à eux, ont opté pour une mesure plus conforme à leurs besoins : le mille nautique est l'arc intercepté à la surface du globe par un angle d'une minute au centre de la terre. Le méridien terrestre mesure donc, pour les marins, (360° x 60' =) 21600 milles nautiques.
Il faut donc toujours garder à l'esprit l'exacte analogie entre distances en milles et angles en minutes. Par exemple, 140 M équivalent à 140', soit 2° 20' et réciproquement.

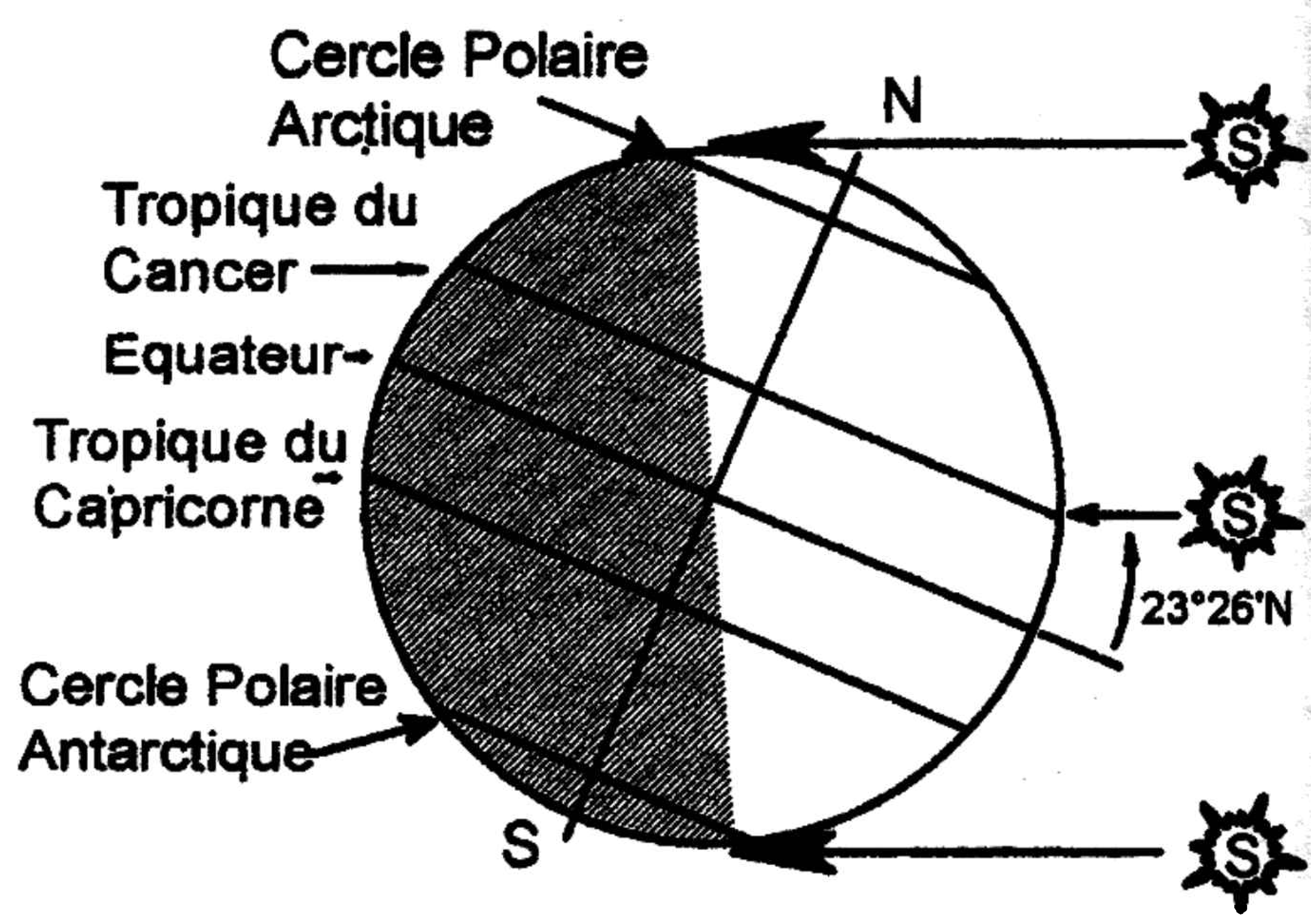
Attention : le mille nautique est, par définition, fourni par une minute d'arc de méridien. En effet tous les méridiens ont la même longueur, ce qui n'est pas le cas des parallèles qui "rétrécissent" au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur pour atteindre les pôles où la longueur du dernier (90° N ou 90° S) est nulle. Il faut donc toujours mesurer les angles et les distances sur les bords droit ou gauche de la carte, jamais sur les bords inférieur ou supérieur.

② Les mouvements de la Terre par rapport au Soleil :

a) Le mouvement quotidien de la Terre autour de son axe : elle effectue un tour sur elle-même en 1 journée, autrement dit 360° en 24 h, soit 15° par heure en moyenne.

b) Le mouvement annuel de la Terre autour du Soleil : En une année, la Terre occupe successivement les 4 positions remarquables suivantes :





__Position 1__ : Le Soleil est au zénith d'un point situé sur un parallèle à 23°26' N. Il n'ira pas plus haut.
Ce parallèle particulier est le **Tropique du Cancer**. Au pôle Nord, il y a une portion de la Terre qui ne verra pas le Soleil se coucher. C'est l'intérieur du cercle polaire arctique à 66°34'N.
A l'inverse, au Sud, une portion de la Terre au sud du cercle polaire antarctique ne le verra pas se lever.
Nous sommes le 21 juin, solstice d'été. Chez nous, c'est le jour le plus long de l'année.

__Position 2__ : Le Soleil est au zénith de l'équateur. Deux observateurs placés aux pôles verraient le Soleil tourner tout autour d'eux, au ras de l'horizon.
Nous sommes le 21 septembre, équinoxe d'automne.
Les durées du jour et de la nuit sont égales sur toute la Terre.

__Position 3__ : Le Soleil est au zénith d'un point situé sur un parallèle à 23°26' S. Il n'ira pas plus bas.
Ce parallèle particulier est le **Tropique du Capricorne**. Au pôle Sud, il y a une portion de la Terre qui ne verra pas le Soleil se coucher. C'est l'intérieur du cercle polaire antarctique à 66°34'S.
A l'inverse, au Nord, une portion de la Terre au nord du cercle polaire arctique ne le verra pas se lever.
Nous sommes le 21 décembre, solstice d'hiver. Chez nous, c'est le jour le plus court de l'année.

Position 4 : Le Soleil est au zénith de l'équateur. Deux observateurs placés aux pôles verraient le Soleil tourner tout autour d'eux, au ras de l'horizon.
Nous sommes le 21 mars, équinoxe de printemps.
Les durées du jour et de la nuit sont égales sur toute la Terre.

Remarque : Les astronomes, mathématiciens et donc perfectionnistes, ajouteront au moins deux autres figures à cette danse :

- la précession, qui est une rotation conique de l'axe incliné de la Terre autour de son centre. Mais si lente (1 tour en 27560 ans) qu'à notre échelle, elle n'influe pas sur nos calculs. Nous n'en tiendrons donc pas compte.
- la nutation qui est une oscillation de l'axe de la terre autour de lui-même, mais de quelques minutes d'arc seulement (5' en moyenne) et qui est incluse dans les tables de correction des hauteurs mesurées au sextant, fournies dans les éphémérides.

③ La Position Géographique (Pg) :

Au cours de tous ces mouvements on peut dire qu'il y a, à tout instant, un point de la Terre qui se trouve "sous le Soleil exactement". C'est le point où la droite allant du centre du soleil au centre de la terre traverse la surface de notre globe. Un observateur placé à cet endroit verrait le soleil exactement au-dessus de sa tête, à sa verticale, à son zénith. Cette position géographique porte le nom de point **Pg**. Il fait le tour de la Terre en 24 heures. Il se déplace donc à 1666 km/h environ à la surface du globe, toujours entre les deux Tropiques.
On sait depuis longtemps calculer à l'avance les coordonnées du point **Pg** en latitude et en longitude. Ces coordonnées sont données dans des tables appelées "Ephémérides".

La *latitude* du point Pg est appelée **"Déclinaison (D)"**. Elle est modifiée par le mouvement annuel de la Terre autour du Soleil. Elle varie donc lentement au cours de l'année. Elle se mesure comme la latitude, à partir de l'équateur, passant d'une valeur de 23°26'N le 21 juin à 23°26'S le 21 décembre.
La *longitude* du point Pg est appelée **"Angle Horaire vrai zéro (AHvo)"**. Il est modifié par la rotation quotidienne de la Terre autour de son axe. A la différence de notre longitude qui se mesure sur 180° à l'Est et à l'Ouest du méridien de Greenwich, l'Angle Horaire se mesure sur les 360° du tour de la terre qu'il parcourt en 24h, soit 15° par heure en moyenne. Le méridien origine 0° étant toujours celui de Greenwich. Ainsi une longitude de 20° Est et un angle horaire de 340° désignent le même méridien.

Il est bien entendu impossible que les éphémérides donnent D et AHvo pour chaque seconde. C'est donc à l'utilisateur d'interpoler pour déterminer la position exacte de Pg au moment précis de son observation.

Les éphémérides permettent donc de déterminer le premier élément nécessaire à la Navigation Astronomique : la position précise du "pied" d'un astre à la surface de la terre. C'est en effet par rapport à cet "amer virtuel" que nous allons maintenant nous situer.

Exemples d'usage des éphémérides :

Soit à calculer les éphémérides du soleil pour le 16 février 1997 à 10h 04mn 27s TU ?

① D' après les éphémérides de **Voiles & Voiliers**:

DATE	MARÉE à BREST				PHASES DE LA LUNE	SOLEIL (UT)	
	phase	HEURE LÉGALE	HAUTEUR en mètres	coef		GHA (AHVO)	T.PASS et DÉCL
DIM **16**	BM	06 h 11	2,65 m			00h 178°28'1	T.pass: 12.14.06
	PM	12 h 22	5,20 m	41		06h 266°28'3	D 06 h S. 12°18
	BM	18 h 48	2,75 m			12h 356°28'5	D 12 h S. 12°13
						18h 86°28'8	D 18 h S. 12°08
LUN **17**	PM	01 h 07	5,30 m	41		00h 176°29'0	T.pass: 12.14.02
	BM	07 h 35	2,65 m			06h 266°29'3	D 06 h S. 11°57
	PM	13 h 47	5,30 m	44		12h 356°29'6	D 12 h S. 11°52
	BM	20 h 07	2,60 m			18h [illegible]	D 18 h S. 11°47

Les éphémérides de soleil sont mentionnées dans les 2 dernières colonnes, à l'intitulé "SOLEIL (UT)", pour 0, 6, 12 et 18h TU.
Colonne "GHA (AHVO)" : Angle horaire vrai origine en degrés, minutes et 1/10 de minute ;
Colonne "T.PASS et DECL." :
"T.Pass." : Indique l'heure TU du passage du soleil au-dessus du méridien de Greenwich ;
"D" : Déclinaison en degrés et minutes, précédée du sens (N ou S).

A - Calcul de AHvo à 10h 04mn 27s :

On part de l'AHvo de l'heure inférieure la plus proche, soit 6h, qui est de 266° 28.3'. La différence entre 6h et 10h 4mn 27s est de 4h 4mn 27s.

Touches		Affichage	Explications
4 °'" 4 °'" 27 °'"		***4.074166667***	Différence heure (décimale)
	×		multipliée
15	+	***61.1125***	par 15° (variation moyenne horaire), +
266 °'" 28.3 °'"		***266.4716667***	l'Ahvo de l'heure inférieure en décimal
	=	***327.5841667***	égale l'Ahvo en décimal
	°'"←	***327° 35° 3***	converti en sexagésimal (327° 35' 3")

B - Calcul de D à 10h 04mn 27s :

La déclinaison varie si peu en 6 h que nous ferons cette évaluation "à l'oeil" :

D à 6h : S 12°18
D à 12h : S 12°13 } D à 10h : S 12°14

Le 16/02/97 à 10h 04mn 27s :
AHvo : 327° 35' 3"
D : 12° 14' S

② D'après les éphémérides de **l'Almanach du Marin Breton** :

	Fév.		Déclinaison à 0 h U.T.	d	AHvo à 0 h U.T.	V	T. Pass. U.T.	Lever U.T.	Coucher U.T.
n.			° '	'	° '	°	h. mn. s.	h. mn.	h. mn.
17	15	S	12 44,0		176 27,3		12 14 09	7 11	17 18
8	16	D	12 23,3		176 28,1		12 14 06	7 09	17 20
0	17	L	12 02,5		176 29,0		12 14 01	7 07	17 22
.1	18	M	11 41,4		176 30,2	15,001	12 13 56	7 05	17 24
.3	19	M	11 20,2		176 31,5		12 13 51	7 03	17 25
.4	20	J	10 58,7		176 33,0		12 13 45	7 01	17 27
.6	21	V	10 37,1		176 34,7		12 13 38	6 59	17 29
8	22	S	10 15,4	0,9	176 36,5		12 13 30	6 57	17 30

A la différence des éphémérides de Voiles & Voiliers, nous n'avons ici AHvo et D qu'une fois par jour, à 0h. Dans ce cas la différence horaire est égale à l'heure de la visée, il n'y a donc aucun calcul à faire pour la déterminer.
L'écart peut être parfois important, néammoins comme ces éphémérides indiquent pour chaque jour les variations horaires de AHvo (colonne V) et de D (colonne d), en utilisant ces valeurs dans les calculs on garde une excellente précision dans les résultats.

A - Calcul de AHvo à 10h 04mn 27s :

Touches		Affichage	Explications
10 °'" 4 °'" 27 °'"		***10.07416667***	Différence heure (décimale)
	×		multipliée
15.001	+	***151.1225742***	par variation horaire (V), plus
176 °'" 28.1 °'"		***176.4683333***	l'Ahvo à 0h en décimal
	=	***327.5909075***	égale l'Ahvo en décimal
	°'"←	***327° 35° 27.2***	converti en sexa. (327° 35' 27.2")

B - Calcul de D à 10h 04mn 27s :
Un coup d'œil à la colonne Déclinaison nous montre que celle-ci est en phase de diminution, jour après jour. Par conséquent elle va aussi diminuer entre 0h et l'instant de notre visée, de la valeur de la variation en 10h 04mn 27s. Nous soustrairons donc cette valeur de la déclinaison à 0h.

Touches		Affichage	Explications
10 °'" 4 °'" 27 °'"		***10.07416667***	Différence heure (décimale) depuis 0h
	×		multipliée
0 °'" .9 °'"	–	***0.1511125***	par variation horaire (d), moins
12 °'" 23.3 °'"		***12.8833333***	Déclinaison à 0h en décimal
	=	***-12.23722083***	égale la déclinaison en décimal
	°'"←	***-12° 14° 14.***	convertie en sexa. (12° 14' 14")
			(ne vous occupez pas du signe –)

Le 16/02/97 à 10h 04mn 27s :
AHvo : 327° 35' 27,2"
D : 12° 14' 14" S

Le Sextant :

Le sextant est un instrument d'optique permettant de mesurer l'angle aOb selon lequel un observateur placé en O voit deux objets éloignés a et b.
Il permet donc, entre autres, de mesurer l'angle que peut voir un observateur entre un astre et l'horizon. On parle alors de "hauteur" de l'astre. Cette hauteur directement lue sur l'instrument en degrés, minutes et secondes d'angle est appelée "Hauteur instrumentale (Hi)".

Pour mesurer la hauteur d'un astre, le soleil par exemple, on commence par mettre l'appareil à 0, en amenant le tambour à 0 et le curseur de l'alidade (partie mobile) en face du 0 du limbe (secteur gradué de la partie fixe).
Puis on intercale tous les filtres et on vise directement le soleil. Attention : ne procédez pas en sens inverse, en cherchant d'abord le soleil puis en intercalant les filtres après : il est très dangereux pour les yeux de viser le soleil sans filtre.
Une fois le soleil trouvé, relevez les filtres un à un pour obtenir une image claire sans être éblouissante. En théorie, le soleil devrait vous apparaître comme un cercle complet, sans "raccord". Cependant en général, les deux demi-cercles droit et gauche apparaissent légèrement décalés, c'est "l'erreur de collimation". Pour évaluer cette erreur, tourner le tambour pour obtenir un cercle parfait. La mesure (quelques minutes) que vous obtenez alors est la valeur de l'erreur de collimation de votre sextant. Il est prudent de contrôler cette valeur avant chaque mesure car elle peut varier, en fonction de la température notamment, pour un même appareil, un même jour.

Attention : la correction de la collimation devra toujours s'effectuer en **sens inverse** pour annuler l'erreur : si la valeur ainsi mesurée est négative (avant le 0), il faudra l'**ajouter** à toutes les observations ultérieures. Inversement, si elle est positive, il faudra la **soustraire**.

Une fois le soleil trouvé, les filtres réglés et la collimation notée, on peut procéder à la mesure de la hauteur : pour cela on débraye l'alidade et on bascule le corps du sextant en conservant l'image du soleil dans le miroir à droite de la visée, jusqu'à ce que l'horizon apparaisse dans la partie gauche. Il sera sans doute nécessaire de relever quelques filtres pour que l'horizon soit nettement visible.
Il faut maintenant amener le bord inférieur du soleil à tangenter l'horizon, en utilisant le tambour du sextant. Pour s'assurer que l'on mesure bien la verticale du soleil, on balance légèrement l'appareil de droite à gauche autour de l'axe de l'œil en contrôlant que le soleil ne s'enfonce pas dans l'eau. A l'instant précis où l'on obtient la tangence, on note l'heure TU exacte, à la seconde près.

La correction des hauteurs observées : Cette mesure faite au sextant doit toujours être corrigée pour tenir compte de certaines différences entre la théorie géométrique qui sert de base aux calculs et la pratique réelle de la visée. Par exemple :
- on mesure la hauteur sur le bord inférieur du Soleil alors que les calculs sont prévus pour une mesure au centre de l'astre,
- les valeurs sont données pour une observation au ras de l'eau alors qu'en général on est au-dessus...

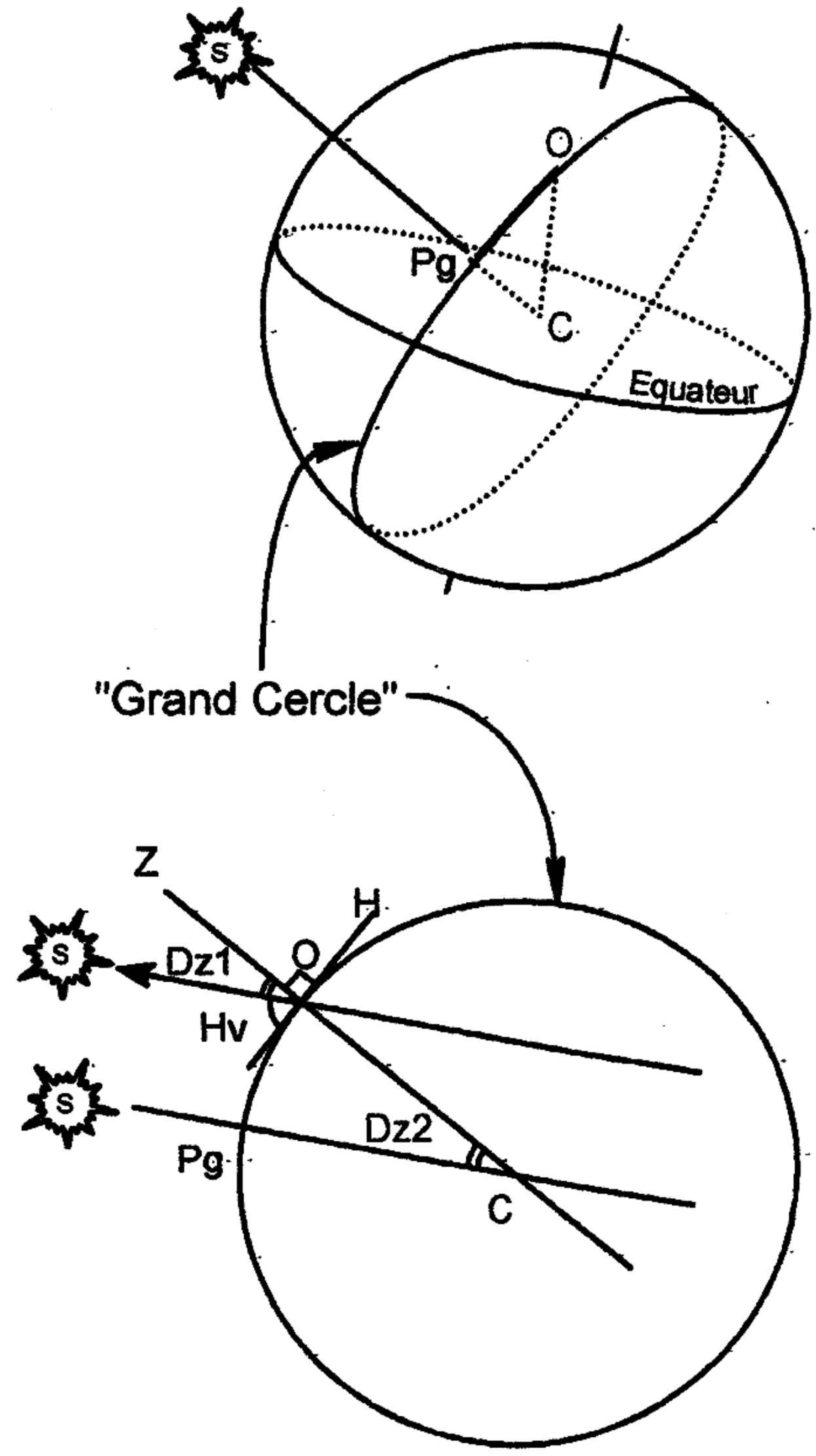
Pour ces corrections, on utilise des tables toutes faites fournies avec les éphémérides.

La mesure obtenue après avoir appliqué toutes ces corrections à la hauteur instrumentale (Hi) s'appelle dès lors "**Hauteur vraie (Hv)**".

Mais à quoi sert cette mesure ?

La Distance Zénithale (Dz) :

Regardez le schéma ci-contre : il montre que, lorsque vous mesurez la "hauteur" du soleil, vous êtes forcément sur un "grand cercle" ayant pour centre C le centre de la terre et passant par vous (O) et le point Pg. La distance O-Pg est un arc de ce grand cercle. Tous ces éléments : vous, le soleil, le point Pg, le centre de la terre, le "grand cercle", sont sur un même plan.



Ce deuxième schéma vous montre ce plan :

- L'angle Hv est la hauteur vraie que vous avez mesurée au sextant entre le bord inférieur du soleil S et la ligne d'horizon H.
- L'angle Dz_1 ayant le point O (vous-même) pour sommet est l'angle entre le soleil et la droite Z qui est la verticale passant par vous. Puique l'angle entre la verticale Z et l'horizontale H est de 90°, Dz_1 est le complémentaire de la hauteur mesurée Hv. Autrement dit : $Dz_1 = 90° - Hv$
- L'angle Dz_2 ayant pour sommet C (centre de la terre) détermine l'arc de grand cercle entre l'observateur et le point Pg (O-Pg). Exprimé en minutes, cet angle est aussi, par définition, la longueur en milles de cet arc O-Pg. C'est la "**Distance zénithale (Dz)**".

Or ces 2 angles Dz_1 et Dz_2 sont égaux car ils sont aussi définis :

- par les 2 rayons du soleil (droites S) parallèles par définition,
- et par leur sécante Z.

Par conséquent Dz_1 et Dz_2 sont des angles "correspondants", et sont donc égaux.

En d'autres termes, la mesure de la hauteur du soleil Hv permet, grâce à la formule $Dz = 90° - Hv$, de déterminer la distance (en minutes ou en milles) qui nous sépare du point Pg.

Et c'est le deuxième élément nécessaire à la Navigation Astronomique.

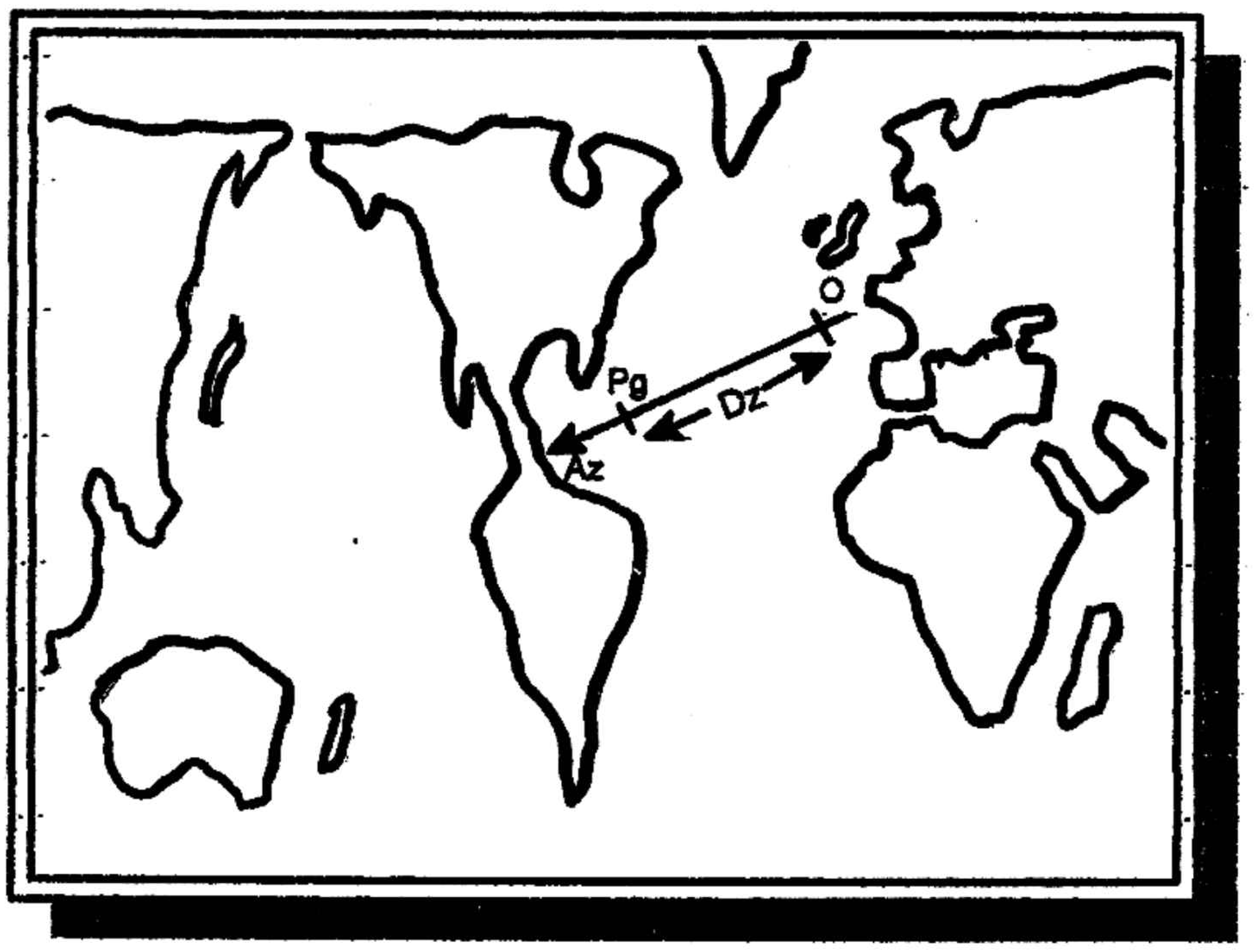
Chapitre 2 : La droite de hauteur de Soleil.

Pendant très longtemps, les marins n'ont su utiliser, pour se positionner, outre l'estime, que la latitude et la longitude à la méridienne que nous étudierons au chapitre suivant, ce qui donnait une position exacte une fois par jour, à condition qu'à midi le Soleil ait pu être visible. Sinon...
L'invention de la droite de hauteur de Soleil qui permet de se situer à n'importe quelle heure de la journée, quelque soit la position du point Pg, date de la fin du XIX° siècle, elle est attribuée à Marc de Sainte-Hilaire.

<u>Théorie</u> :

Souvenez-vous de l'exemple simple de notre introduction : M. Marin parvenait à se situer par rapport à un amer de position connue en déterminant uniquement son gisement et sa distance.
Imaginons maintenant que nous disposions d'une planisphère recouvrant la totalité du globe. Nous pourrions (théoriquement) :

1 - Déterminer AHvo et D grâce aux éphémérides, et placer ainsi le point Pg sur la carte. Ce serait notre "amer" ;



2 - Après avoir mesuré la hauteur de l'astre, calculer $Dz = 90° - Hv$, nous déterminerions ainsi la distance précise qui nous sépare du point Pg, notre "amer".

3 - Relever au compas la direction dans laquelle on a mesuré la hauteur de l'astre et tracer ce cap passant par le point Pg. Ce serait le gisement cherché. Il ne nous resterait plus alors qu'à porter Dz depuis Pg sur la droite indiquant le cap.

Ces 3 opérations détermineraient notre position (O).

Malheureusement cette méthode, proposée il y a longtemps par certains théoriciens, est absolument inapplicable telle quelle en raison de son extrême imprécision :

- Une planisphère complète est très imprécise,
- La direction de la mesure déterminée au compas de relèvement est très peu fiable, et comme le point Pg est très éloigné (parfois plusieurs milliers de milles), la plus petite erreur dans le cap se trouve énormément amplifiée,
- Cette direction est très difficile à tracer car, sur une très grande carte, les angles sont déformés par la projection plane.

C'est pour ces raisons que le problème à résoudre a été d'adapter cette méthode pour pouvoir faire un tracé précis sur une carte à plus grande échelle.

La solution que nous appliquons encore aujourd'hui, a donc été découverte par Marc de Sainte-Hilaire. Ce monsieur, amiral de son état, a eu en effet une idée géniale : plutôt que de tracer le point à partir d'un Pg inaccessible, il propose de retourner le problème et d'établir une position estimée (donc inexacte, mais proche du point réel), et d'utiliser ce point comme un nouvel "amer" à partir duquel nous établirons alors notre position réelle, en portant une distance suivant le relèvement de Pg passant par ce point

Reprenons notre exemple de départ, avec nos deux marins et leur balise : supposons que Monsieur Marin ait tenu une estime qui le situe sur la carte sur un point précis, à une distance de 30 M de la balise. Supposons encore que son bateau soit équipé d'un radar qui lui permette de "voir" la balise à une distance de 29 M au cap 200°. Monsieur Marin pourrait donc tracer sur sa carte, **à partir de son point estimé**, ce cap de 200° et y porter, en direction de la balise, la distance de 1M, différence entre la distance estimée et la distance réelle. Le nouveau point ainsi obtenu serait donc la nouvelle position de son bateau.
Mais que penser de ce nouveau point ? La distance est parfaitement exacte : ce nouveau point est effectivement à 29 M de la balise. Par contre notre capitaine n'est pas vraiment sûr de la direction puisque celle ci est obtenue par rapport à sa position estimée, peut-être légèrement fausse. Monsieur Marin décide donc de tracer une petite portion d'un cercle de 29 M de rayon centré sur la balise, de part et d'autre du point qu'il vient de déterminer. Ainsi, il sera au moins sûr d'être sur cette portion de cercle.
Compte tenu de la différence entre le rayon du cercle (29M) et la longueur de l'arc de cercle (1 ou 2M), Monsieur Marin se dit qu'il peut bien tracer une droite au lieu d'une courbe, la différence ne sera pas bien grande.

Monsieur Marin vient de tracer une "droite de hauteur de balise" ; le cap de 200° qu'il a porté à partir de sa position estimée est "l'azimut" ; la longueur de 1M, différence entre la distance réelle et la distance estimée est "l'intercept".

Bien sûr, avec le soleil, les choses sont un peu différentes (les mauvaises langues disent "plus compliquées") :
A l'heure H, je mesure la hauteur du soleil (Hv) depuis une position estimée Pe de longitude G et de latitude L, ce qui me donne la distance zénithale réelle (Dz = 90°-Hv)

Grâce aux éphémérides, je détermine la position du point Pg,

Je vais ensuite utiliser des formules mathématiques pour calculer :

- la direction précise (azimut) dans laquelle se trouve ce point Pg ;
- la hauteur Hc à laquelle j'aurais dû théoriquement observer le soleil, dont je déduis la distance zénithale théorique correspondante.

Je compare alors les deux distances zénithales et si je constate qu'il y a une différence, je vais utiliser cette différence pour me recaler en position par un tracé sur ma carte.

Nous distinguerons donc trois étapes successives dans l'élaboration de la droite de hauteur :

- l'observation,
- les calculs,
- le tracé.

L'observation :

Il s'agit de mesurer la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon et de noter précisément l'heure T.U. de cette observation. Bien sûr, il faudra corriger la hauteur instrumentale de l'erreur de collimation éventuelle, ainsi que de toutes les corrections habituelles pour obtenir la hauteur vraie Hv.

Les calculs :

C'est la partie la plus effrayante de l'opération. Pourtant avec un peu de méthode, de logique et une calculatrice programmable, c'est tout à fait compréhensible.

De quelles données dispose-t-on ?

- Des coordonnées du point Pg (AHvo et D) : vous les avez calculées à partir des éphémérides, pour l'heure T.U. de l'observation ;
- Des coordonnées de votre position estimée : longitude estimée (G) et latitude estimée (L)

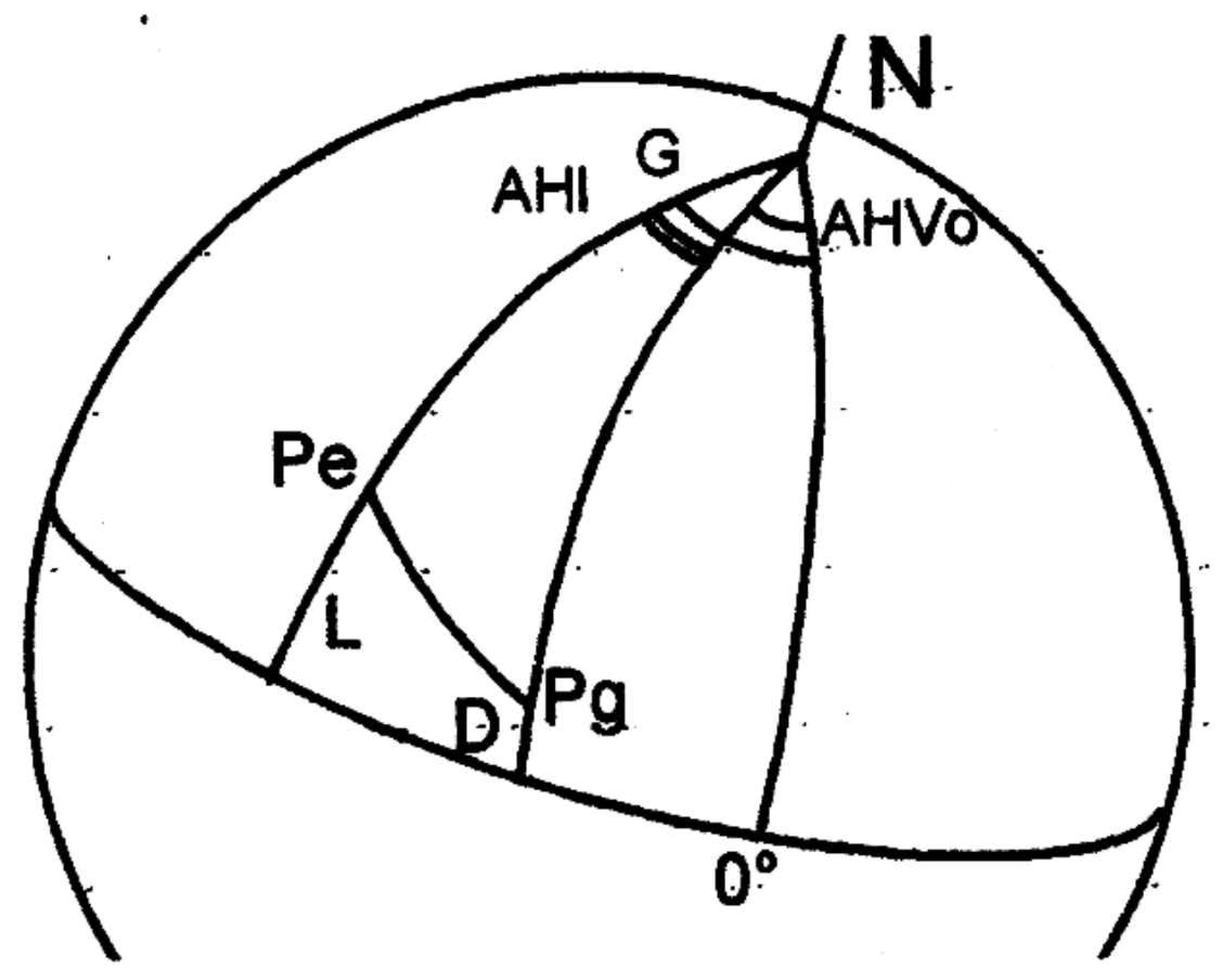
Que cherche-t-on ?

- La hauteur théorique que vous auriez dû mesurer si vous êtes bien là où vous croyez être, sur votre position estimée Pe ;
- Le gisement précis du point Pg par rapport à votre position estimée (azimut).

On obtient ces résultats en résolvant deux équations de trigonométrie sphérique appliquées à un triangle appelé "triangle de position".

• Les 3 sommets de ce triangle sont :

1 - le pôle Nord (N),
2 - la position estimée de l'observateur (Pe),
3 - le point Pg .



• Les 3 éléments connus de ce triangle sont :

1 - l'angle au pôle Nord ou Angle Horaire local AHl : il s'agit tout simplement de l'angle entre votre méridien (votre longitude estimée G) et celui du point Pg (AHvo).

$$\mathbf{AHl = AHvo \pm G}$$

où : G (Long. estimée) est + si Est
- si Ouest

Nota : Corrigez le résultat en ajoutant ou en retranchant 360°, le cas échéant, pour obtenir un AHl entre 0° et 360° .

2 - la longueur du côté PeN : c'est la différence 90°- votre latitude estimée L,

3 - la longueur du côté PgN : c'est la différence 90° - la déclinaison du soleil D.

• <u>Les 2 éléments cherchés sont :</u>

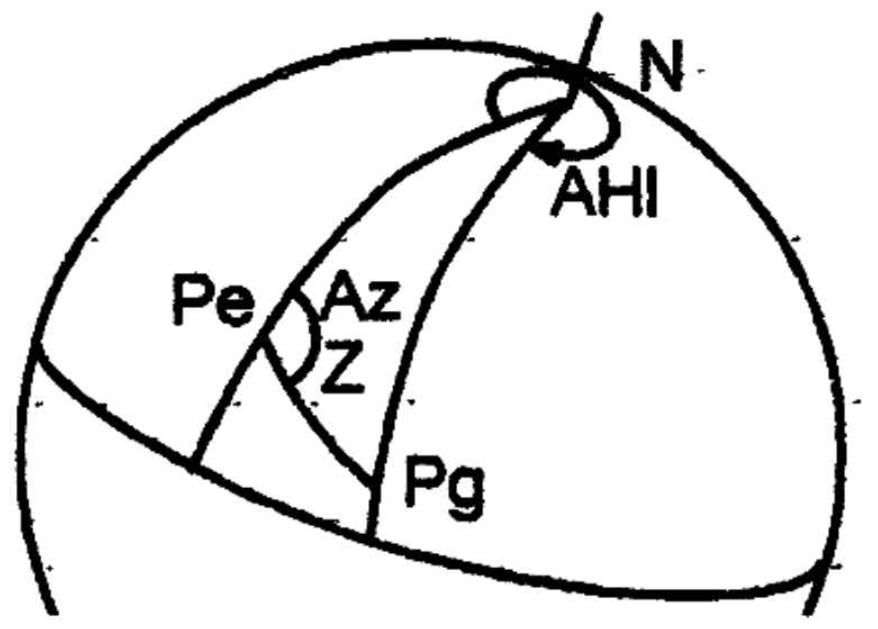
1 - La hauteur calculée Hc : c'est, par définition, le complément de la distance zénithale calculée PePg (Hc = 90° - PePg). On la calcule donc directement par la formule :

$$\mathbf{hc = \sin^{-1}((\sin L \times \sin D) + (\cos L \times \cos D \times \cos AHI))}$$

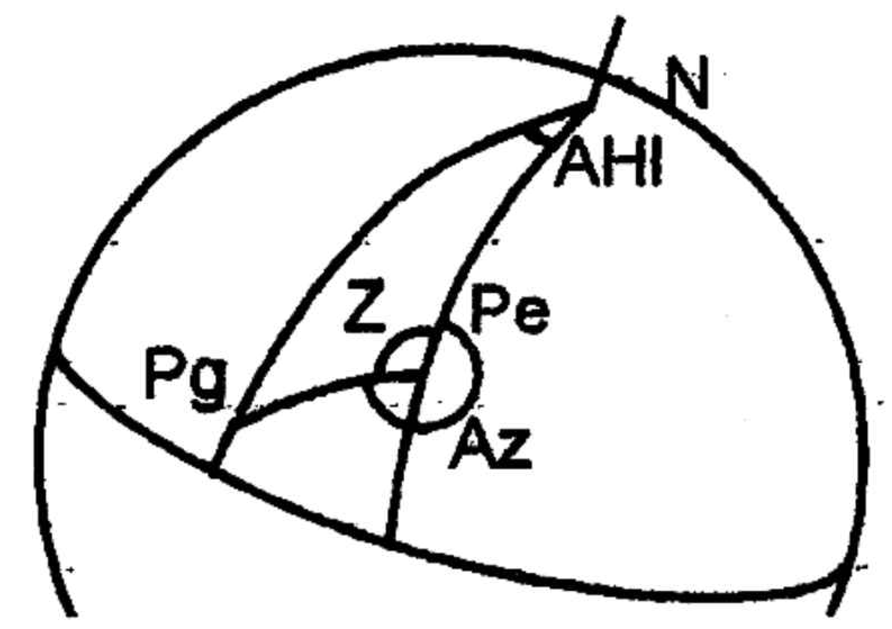
2 - l'angle au sommet Pe : c'est l'angle entre le côté PePg (calculé ci-dessus) et le côté PeN (90° - L). Il permet de déterminer l'azimut Z. Il est donné par la formule :

$$\mathbf{Z = \cos^{-1}\left(\frac{\sin D - (\sin L \times \sin hc)}{\cos L \times \cos hc}\right)}$$

L'angle ainsi calculé est bien sûr toujours l'angle intérieur du triangle. Or, selon la position du point Pg par rapport à l'observateur, il faudra modifier ce résultat pour obtenir un azimut compté de 0° à 360° à partir du Nord :



AHI est compris entre 180° et 360°
le matin avant la méridienne
Az = Z



AHI est compris entre 0° et 180°
l'après midi, après la méridienne
Az = 360° - Z

Le Tracé :

Nous disposons maintenant des éléments nécessaires à notre tracé sur la carte :

- notre position estimée Pe,
- l'azimut Az du point Pg,
- la hauteur mesurée au sextant Hv et la hauteur calculée Hc.

Mais pour bien comprendre cette construction, quelques approfondissements sont nécessaires:

Le cercle de hauteur :

Nous avons vu que la hauteur mesurée au sextant (Hv) permettait de déterminer la Distance zénithale Dz (Dz = 90° - Hv), qui est en pratique, la distance qui nous sépare du pied de l'astre (Point Pg). Supposez que vous vous déplaciez tout en mesurant continuellement la hauteur du Soleil. Si vous vous rapprochez du point Pg, Dz va diminuer et donc Hv va grandir. Si au contraire, vous vous éloignez du point Pg, Dz va augmenter et Hv va diminuer. Autrement dit : plus vous serez proche du point Pg, plus le soleil vous apparaîtra haut dans le ciel, et inversement.
En revanche, si vous vous déplacez sur votre droite ou votre gauche, en restant à la même distance du point Pg, Dz ne variera pas et donc Hv non plus. Dans ce dernier cas, en restant toujours à la même distance du point Pg, vous pourriez parcourir un immense cercle dont Pg serait le centre et Dz le rayon, et sur lequel le Soleil vous apparaîtrait toujours à la même hauteur. C'est "**le cercle de hauteur**".

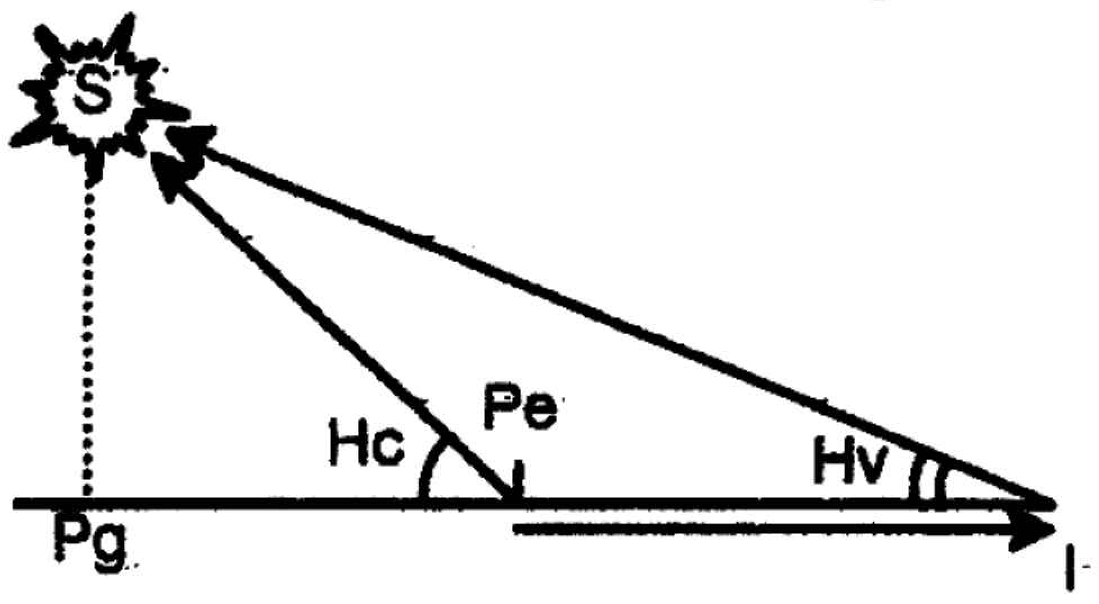
L'intercept :

Notre tracé va être fait à partir de notre position estimée. Sauf "coup de bol" extraordinaire qui nous positionnerait exactement sur le cercle de hauteur, cette position estimée sera soit à l'extérieur, soit à l'intérieur de ce cercle. Pour déterminer cela, nous allons comparer nos deux hauteurs : la hauteur réellement observée (Hv) et la hauteur théorique calculée (Hc).

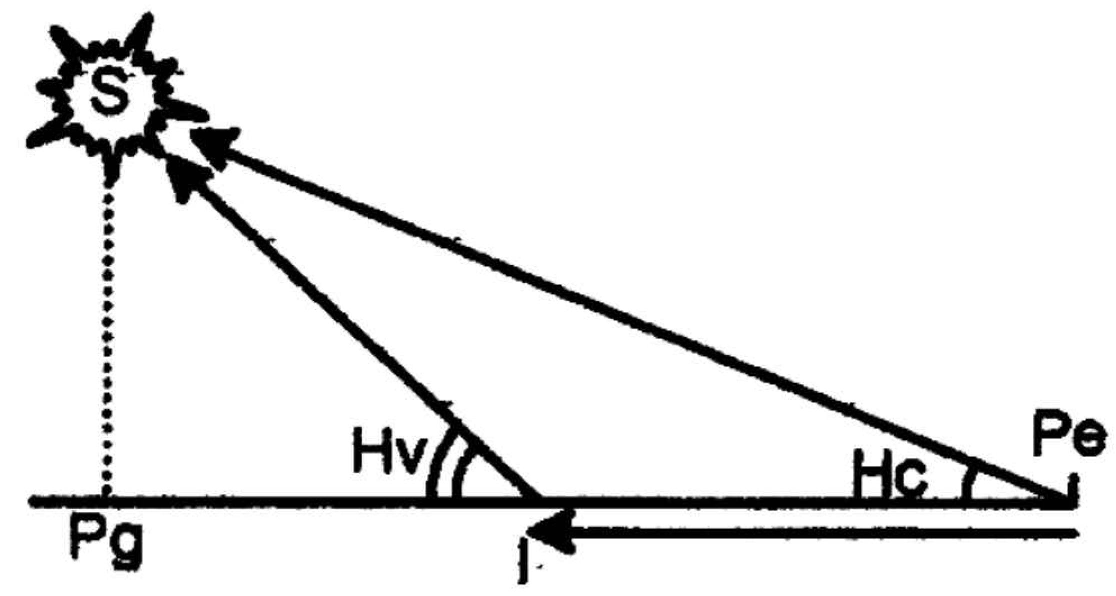
Comparer ces deux mesures revient à comparer leurs distances zénithales respectives:

- si la hauteur mesurée hv est inférieure à la hauteur calculée hc, Dz mesurée est supérieure à Dz calculée : votre point estimé est trop près de Pg, à l'intérieur du cercle de hauteur ;
- au contraire, si la hauteur mesurée est supérieure à la hauteur calculée, Dz mesurée est plus petite que Dz calculée et vous êtes trop loin de Pg, à l'extérieur du cercle de hauteur;
- bien sûr, si ces deux mesures sont égales, les deux Dz sont aussi égales et vous êtes sur le cercle de hauteur, BRAVO !

Traditionnellement, on représente cela par les petits schémas suivants :



Hv < Hc
Pe trop près de Pg
intercept opposé à l'astre



Hv > Hc
Pe trop loin de Pg
intercept vers à l'astre

(Attention : ces schémas, utiles sur le plan mnémotechnique, ne correspondent pas exactement à la réalité : les rayons du soleil sont parallèles et la surface de la terre est courbe)

La hauteur et la distance zénithale étant liées (car complémentaires à 90°), la différence angulaire entre les deux hauteurs se retrouve à l'identique entre les deux distances zénithales. Autrement dit : si nous trouvons une différence de 20' entre les deux hauteurs, il y aura de même une différence de 20' (soit 20 milles) entre les deux distances zénithales.
Cette différence est la distance en milles qui sépare votre position estimée du point le plus proche du cercle de hauteur. On l'appelle **l'intercept** I.

La droite de hauteur :

Partant de votre position estimée tracée sur votre carte, vous portez l'azimut en indiquant par une flèche la direction du point Pg, puis vous reportez au compas la longueur de l'intercept :

- du point estimé vers Pg si vous êtes à l'extérieur du cercle de hauteur ;
- du point estimé à l'opposé de Pg si vous êtes à l'intérieur du cercle de hauteur.

Le nouveau point ainsi déterminé est **sur** le cercle de hauteur. Vous pouvez être exactement sur ce point déterminatif, mais il est plus probable que vous soyez à quelques milles à côté, à sa droite ou à sa gauche par rapport à l'azimut, mais toujours sur le cercle.
A l'échelle de la carte, le cercle de hauteur est si grand qu'on peut l'assimiler à sa tangente. Cette tangente au cercle est une portion de droite perpendiculaire à l'azimut (qui est un rayon du cercle) au point déterminatif. C'est **la droite de hauteur**.

Exemple : le 16 février 1997, vous observez le Soleil à hi = 25° 10', à 10h 4 mn 27s TU. Votre position estimée est 44° 3' N, 2° 53' W. L'erreur instrumentale est de -2'

Les éphémérides vous donnent pour le 16 février : AHvo = 327° 35'
(cf. pages 8-9) D = S 12° 14'

Nota : Avant de commencer, vérifiez que la mémoire MR de votre calculatrice est à zéro.
***Attention** au signe des différentes mesures : L et D positif si Nord, négatif si Sud*

Touches		Affichage	Explications
			Saisie de la latitude estimée L :
44 °'" 3 °'"		***44.05***	latitude estimée L (N donc positive)
	Kin 1	***44.05***	mise dans registre 1
			Calcul de l'Angle horaire local AHl :
327 °'" 35 °'"	−	***327.5833333***	AHVo moins
2 °'" 53 °'"	=	***324.7***	long. estim. (W donc nég.) égale
	Kin 2	***324.7***	AHl mis dans registre 2
			Saisie de la déclinaison D :
12 °'" 14 °'"	+/−	***-12.23333333***	Déclinaison D (S donc nég.)
	Kin 3	***-12.23333333***	mise dans registre 3
			Calcul de la hauteur vraie
25 °'" 10 °'"	−	***25.16666667***	Hauteur mesurée hi
0°'" 2°'"	+	***25.13333333***	moins collimation
0°'" 11°'"	=	***25.31666667***	plus correction* = hauteur vraie
	°'"←	***25° 19° 0.***	convertie en séxagésimal
	M+		mise en mémoire
			Programme P1 : calcul de la hauteur :
	P1	***25° 12° 36.43***	Hauteur calculée Hc
			Calcul de l'intercept :
	M−	***25.21011878***	Hv - Hc (en mémoire)
	MR	***0.106547885***	égale intercept I en ° décimaux
	×		
60	=	***6.3928731***	converti en milles nautiques
			Programme P2 : calcul de l'azimut :
	P2	***141° 22° 38.3***	Azimut calculé Z
			Ahl (324°) > 180° donc Az = Z

I = 6.4 milles **Z = 141°**

hv (25° 19') > hc (25°12') ⇨ l'intercept est positif
⇨ vous êtes à l'extérieur du cercle de hauteur
⇨ l'azimut sera tracé vers le point Pg.

* la correction utilisée est celle de la Table Simplifiée de la Grille de Calculs (cf. pages 20-21)

Listing des programmes P1 et P2 (sur Casio fx 180p) :

Programme 1
Calcul de la hauteur hc

```
001  Kout 1
002  sin
003  x
004  Kout 3
005  sin
006  +
007  (
008  Kout 1
009  cos
010  x
011  Kout 3
012  cos
013  x
014  Kout 2
015  cos
016  )
017  =
018  sin -1
019  Kin 4
020  ° ' " ←
```

Programme 2
Calcul de l'azimut Z

```
001  (
002  Kout 3
003  sin
004  -
005  (
006  Kout 1
007  sin
008  x
009  Kout 4
010  sin
011  )
012  )
013  ÷
014  (
015  Kout 1
016  cos
017  x
018  Kout 4
019  cos
020  )
021  =
022  cos -1
023  ° ' " ←
```

(Contrôle : avec 10 en K1, 20 en K2 et 30 en K3, P1 = 62° 39' 18.73" et P2 = 40° 9' 10.09")

Utilisation des programmes :

Ces programmes nécessitent le calcul préalable des données nécessaires : L, D et AHl qui seront stockées dans les 3 mémoires de constantes 1, 2 et 3 :

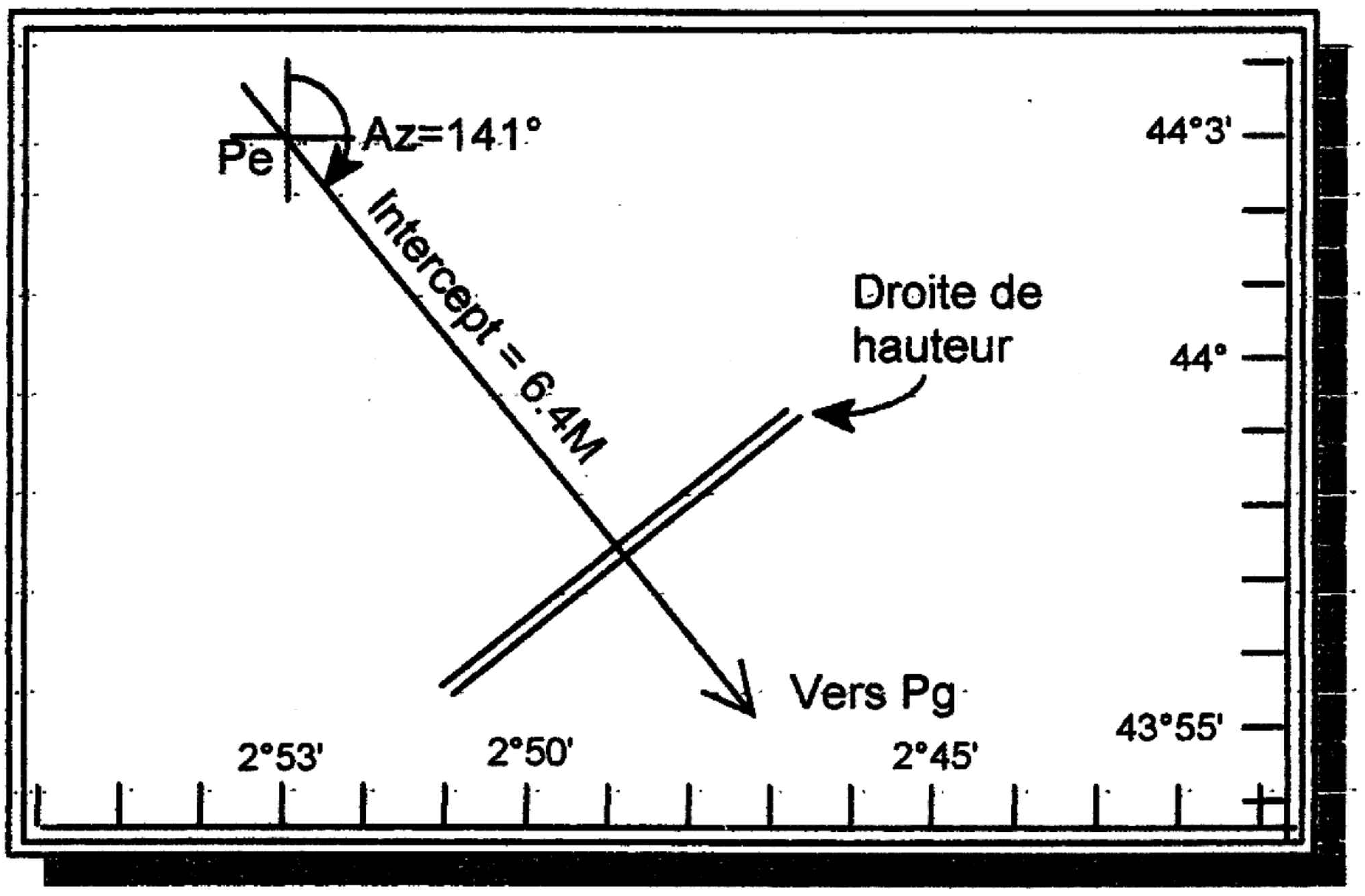
K 1 = L	Latitude estimée *(Nord +, Sud -)*
K 2 = AHl	Angle horaire local
K 3 = D	Déclinaison Soleil *(Nord +, Sud -)*

Il faut éxécuter le programme P1 en premier car il détermine la hauteur calculée et la stocke dans la mémoire K4 où le programme P2 va venir ensuite l'utiliser.

Nous vous proposons en pages 20 une grille vierge destinée à vous faciliter ce calcul et à ne rien oublier. Nous y avons intégré le calcul des éphémérides des pages 8 - 9.
En page 21, nous avons rempli la grille avec l'exemple de la page 17.

Tracé de la droite de hauteur

Traçons enfin notre droite de hauteur :



Détermination du point :

Une seule droite de hauteur ne nous donne pas un point complet. Nous savons être sur cette droite, mais où exactement ? mystère...

Pour obtenir une position plus précise, il faut recouper cette droite par une autre qui peut être une longitude ou une latitude à la méridienne, ou une autre droite de hauteur, voire même, pourquoi pas, le gisement d'un amer aperçu brièvement et formellement identifié.

A moins que les deux ou trois mesures ait été faites dans un laps de temps suffisament bref pour pouvoir utiliser le même point estimé, il faudra tenir compte de la route du bateau entre chacune d'elles. Notez que nous avons déjà évalué ce déplacement pour déterminer nos positions estimées successives. On sera donc amené à pratiquer un "transport de droite".

Simplifications du tracé :

1 - On peut constater qu'il est possible de tracer les deux ou trois droites de hauteur d'une même journée directement à partir de la position estimée ayant servi aux calculs de la dernière, ce qui simplifie considérablement le tracé et épargne la carte.

2 - Les longitude et latitude utilisées dans les calculs n'ont pas besoin d'être exactement celles de votre position estimée. En fait, il peut être préférable de choisir des coordonnées arrondies, bien sûr proches de la réalité, mais qui simplifient le calcul et surtout le tracé sur votre carte : à l'intersection d'un méridien et d'un parallèle, par exemple. Ainsi une position estimée de 47°23,6'N - 2°46'W sera avantageusement transformée en 47°25'N - 2°45'W.

3 - Vous trouverez page 42 un programme qui vous permettra de calculer directement les coordonnées du point d'intersection des 2 droites de hauteur, ce qui supprime tout tracé graphique des droites.

GRILLE DE CALCUL DES DROITES DE HAUTEUR

1 : DONNEES DE BASE

Date

Latitude estimée
Nord + Sud - K 1

Heure TU

Longitude estimée
Est + Ouest -

4 : HAUTEUR DE L'ASTRE

Hauteur mesurée Hi

±

Collimation ±

±

±

Table simplifiée
pr Soleil & Etoiles

Hi	Sol.	Et.
90°	+13'	-3'
45°	+12'	-4'
27°	+11'	-5'
18°	+10'	-6'
13°	+ 9'	-7'
11°	+ 8'	-8'
9°	+ 7'	-9'
7°30'		

Hauteur vraie Hv =

2 : ANGLE HORAIRE LOCAL

Heure ronde inf. Angle horaire

Diff. heure +

x 15° =

ETOILES x 15.042° +

Ascension verse =

AHvo =

Longitude estimée
Est + Ouest -

AHl = K 2

3 : DECLINAISON

Pour heure inf. Pour heure sup.

N+
S-

Var. Décl. Dd +

x =

Si D N+ → aug. => Dd+
→ dim. => Dd-
D S- → aug. => Dd-
→ dim. => Dd+

D = K 3

5 : RESULTATS DES PROGRAMMES

Résultat P2 Z ->

→ Si AHl > 180° Azimut = Z
si AHl < 180° Azimut = 360° - Z

AZIMUT =

Résultat P1 Hc ->

=

Si I + : vers astre
si I - : opp. astre X 60

INTERCEPT =

	SOLEIL	PLANETES	ETOILES	LUNE
Ang. hor. Variation horaire dH	AHvo + 15° x dH ou tables d'interpolation	AHao + (15° + v) x dH (v en bas de AHao) ou tables d'interpolation	Point Vernal : AHso + 15.042° x dH + ascension verse	AHao + (14.32° + v) x dH (v à droite de AHao) ou tables d'interpolation
Déclin. Variation horaire dH	D ± d x dH (d en bas de D)	D ± d x dH (d en bas de D)	Déclinaison étoile Interpolation "à vue"	D ± d x dH (d à droite de D)
Hauteur sextant Correct° parallaxe ½ diamèt. réfracti°	Hi ± collimation + Correction table VII en haut + Correction table VII en bas	Hi ± collimation - Correction table VIII en haut + Correction table VIII en bas		Hi ± collimation - Correction table IX en haut + Correction table IX en bas

GRILLE DE CALCUL DES DROITES DE HAUTEUR

1 : DONNEES DE BASE

Date: 16/2/97

Latitude estimée: Nord + / Sud - — K 1: 44°3'

Heure TU: 10h4m27s

Longitude estimée: Est + / Ouest - — -2°53'

4 : HAUTEUR DE L'ASTRE

Hauteur mesurée Hi: 25°10'

±

Collimation ±: -0°2'

±

Table simplifiée pr Soleil & Etoiles		
Hi	Sol.	Et.
90°	+13'	-3'
45°	+12'	-4'
27°	+11'	-5'
18°	+10'	-6'
13°	+ 9'	-7'
11°	+ 8'	-8'
9°	+ 7'	-9'
7°30'		

±

+0°11'

Hauteur vraie Hv = 25°19'

2 : ANGLE HORAIRE LOCAL

Heure ronde inf.: 6h — Angle horaire: 266°28.3'

Diff. heure: 4h4m27s x 15° = 61.1125 (+)

ETOILES x 15.042° (+)

Ascension verse =

AHvo = 327.5841667

Longitude estimée Est + / Ouest -: -2°53'

AHl = K 2: 324.7

3 : DECLINAISON

Pour heure inf.: -12°18' — N+ / S- — Pour heure sup.: -12°13'

Var. Décl. Dd (+)

x [ ] = [ ]

Si D N+ -> aug. => Dd+
-> dim. => Dd-
D S- -> aug. => Dd-
-> dim. => Dd+

D = K 3: -12°14'

5 : RESULTATS DES PROGRAMMES

Résultat P2 Z -> 141°22'58.3'

Si AHl > 180° Azimut = Z
Si AHl < 180° Azimut = 360° - Z

AZIMUT = 141°

Résultat P1 Hc -> 25°12'36.43

= 0.106547

Si I + : vers astre
si I - : opp. astre

X 60

INTERCEPT = 6.39M

	SOLEIL	PLANETES	ETOILES	LUNE
Ang. hor. Variation horaire dH	AHvo + 15° x dH ou tables d'interpolation	AHao + (15° + v) x dH (v en bas de AHao) ou tables d'interpolation	Point Vernal : AHso + 15.042° x dH + ascension verse	AHao + (14.32° + v) x dH (v à droite de AHao) ou tables d'interpolation
Déclin. Variation horaire dH	D ± d x dH (d en bas de D)	D ± d x dH (d en bas de D)	Déclinaison étoile Interpolation 'à vue'	D ± d x dH (d à droite de D)
Hauteur sextant Correct° parallaxe ½ diamèt. réfracti°	Hi ± collimation + Correction table VII en haut + Correction table VII en bas	Hi ± collimation - Correction table VIII en haut + Correction table VIII en bas		Hi ± collimation - Correction table IX en haut + Correction table IX en bas

Chapitre 3 : La Méridienne

La Méridienne, qu'est-ce que c'est ?

Nous avons vu (page 11) qu'à chaque fois que vous mesurez au sextant la hauteur du Soleil celui-ci est, par construction, sur le même plan que vous-même, le point Pg et le centre de la Terre. Ce plan partage le globe terrestre en 2 hémisphères séparés par un grand cercle passant par vous et le point Pg et dont le centre est le centre de la Terre.
Dans la plupart des cas, ce grand cercle a une "position" à priori indéterminée, inclinée par rapport à l'axe Nord-Sud de la Terre. Dans le cas de la droite de hauteur, nous calculons cette position : c'est l'azimut. Cependant, à l'instant précis où le soleil passe exactement à votre Sud (ou à votre Nord) ce cercle adopte brièvement une position passant par les deux pôles : c'est un méridien.
A cet instant précis, le soleil atteint sa position la plus élevée dans le ciel, c'est la culmination.
La simplification apportée aux calculs par ce cas particulier (qui se reproduit quand même tous les jours) n'a pas échappé aux marins qui l'utilisent depuis longtemps : depuis la plus haute antiquité en ce qui concerne la latitude et depuis le milieu du XVIII° siècle pour la longitude.

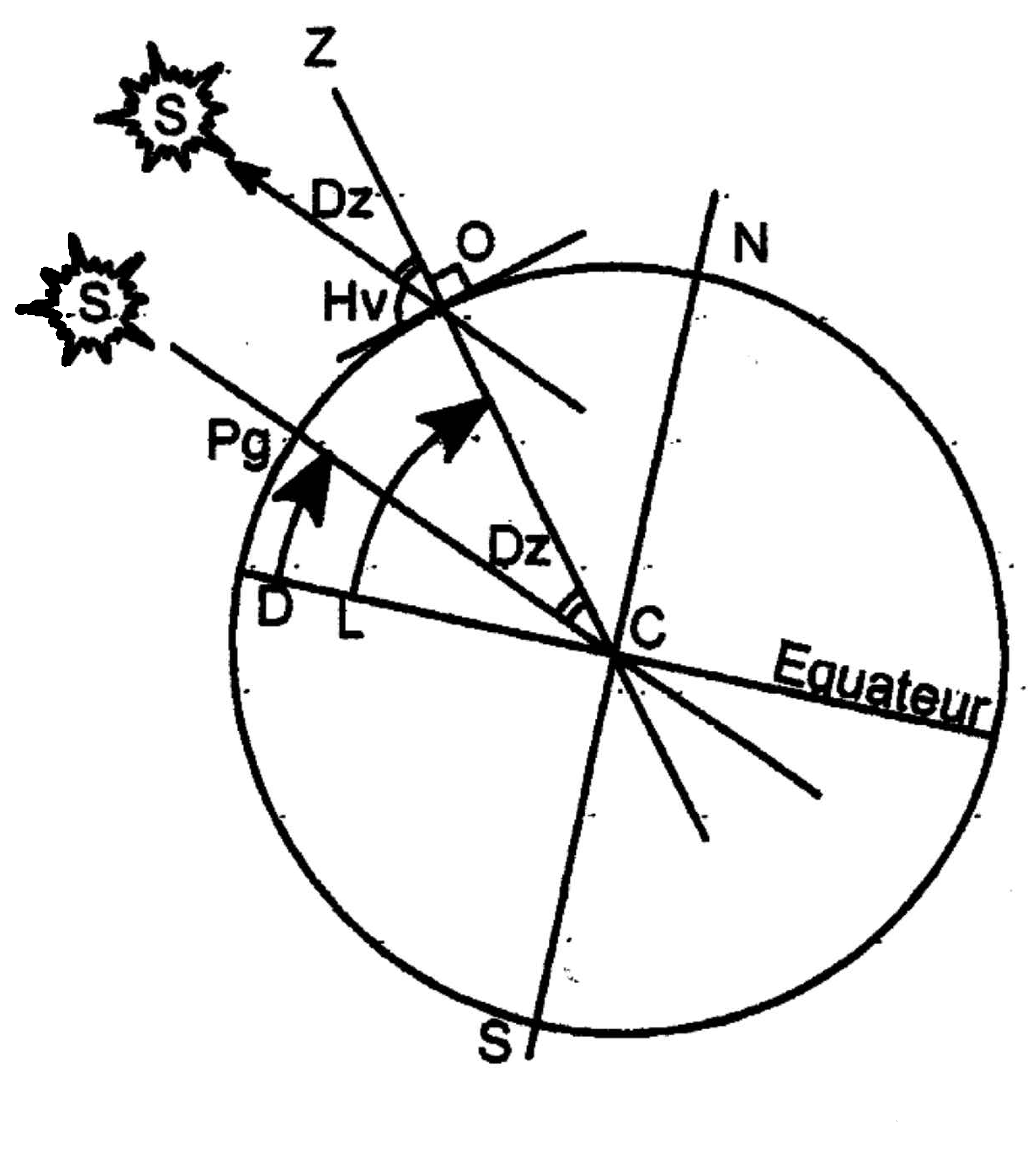
① La Latitude à la méridienne :

Cette situation est un cas particulier de droite de hauteur. L'azimut du point Pg par rapport à l'observateur est, dans ce cas, parfaitement connu. C'est, par définition, votre propre méridien et le soleil culminera donc soit pile à votre Sud (180°), soit pile à votre Nord (0°). La droite de hauteur que nous tracerions serait perpendiculaire à ce méridien et serait donc votre parallèle, celui de votre latitude.

Théorie :
Représentons sur un schéma votre méridien et tous les protagonistes : l'observateur O; le soleil et son "pied" Pg, les pôles, l'équateur...
- La distance zénithale (Dz = 90° - Hv) mesure l'angle qui sépare l'observateur O du point Pg.
- La déclinaison D du soleil mesure l'angle qui sépare le point Pg de l'équateur.
- Donc l'angle qui sépare l'observateur de l'équateur, c'est-à-dire notre latitude L, est égal à la somme de ces deux angles :

$$L = Dz \pm D$$

Ces valeurs sont affectées d'un signe + ou - comme indiqué ci-après :



Pratique :

LA LATITUDE A LA MERIDIENNE

1 - Relever la hauteur de la culmination du Soleil (Hv) ;
2 - Calculez la déclinaison D du Soleil ;
3 - Calculer la Distance Zénithale : Dz = 90° - Hv ;
5 - Calculer la latitude : L= D + Dz.

Attention au signe (+ ou -) à affecter à toutes ces mesures :

- Déclinaison D : Nord + Sud -
- Distance zénithale Dz : + si Nord dans le dos de l'observateur
  – si Sud dans le dos de l'observateur
- **Résultat** : + Latitude L Nord
  –Latitude L Sud

Exemple :

Observations : le 16/02/97, à 12h28mn, observation de la culmination du Soleil Hi = 32°39.6'. Elévation de l'oeil : 2.00m ; erreur instrumentale : +1.7', N dans le dos.

Evaluation de la Déclinaison "à l'œil" :

D à 12 h : S 12° 13'
D à 18 h : S 12° 08'
} D à 12h 28m : S 12° 12'

Signe de D : + si Nord
– si Sud (donc -12°12')

(Les corrections utilisées sont celles de l'Almanach du Marin Breton)

Touches		Affichage	Explications
32 °'" 39.6 °'"	+	***32.66***	Hauteur instrumentale Hi plus
0 °'" 1.7 °'"	+	***32.68833333***	erreur instrumentale plus
0 °'" 12.1 °'"	+	***32.89***	1ère correction plus
0 °'" .2 °'"			2ème correction
	=	***32.89333333***	égale Hauteur Vraie Hv (décim.)
	–		moins
90			90°
	=		égale
		-57.10666667	Distance zénithale Dz.
	+/–	***57.10666667***	Suppression du – car observation avec N dans le dos (Dz est donc positive)
	–		moins (signe de D qui est Sud)
12 °'" 12 °'"			D (déclinaison soleil)
	=	***44.90666667***	égale latitude L en décimal
	°'"←	***44° 54° 24.***	convertie en sexagésimal

Résultat + donc L Nord → **L = 44° 54' 24" N**

② La Longitude à la Méridienne :

Avec la longitude à la méridienne, nous abordons momentanément un nouveau monde. Ici, plus de point Pg, plus d'angle horaire, ni de distance zénithale. Nous entrons dans le royaume du temps rythmé par les chronomètres, les montres à quartz, les tops horaires... C'est pourquoi ce rivage a été longtemps interdit aux marins, faute d'une technologie horlogère assez pointue. Ce n'est qu'au XVIII° siècle qu'un artisan horloger anglais, John Harrison, a pu enfin inventer un chronomètre suffisamment fiable et précis pour permettre ce calcul, ce qui contribuera à assurer pour plusieurs décennies la suprématie de la marine anglaise sur le globe.

Théorie :
Imaginons une voiture circulant sur une route à la vitesse de 60 km/h, soit 1 km par minute. Si vous déterminez qu'elle a mis 10 minutes pour aller d'un point A à un point B, vous pouvez en déduire que ces deux points sont distants de 10 km.
La voiture c'est le "pied du soleil" **Pg**. Mais au lieu d'avancer à 60 km/h, il se déplace à la surface du globe à plus de 1600 km/h. Nous préférerons dire qu'il parcourt 360° en 24h, soit 15° par heure, d'Est en Ouest. Par exemple, si le soleil "survole" notre méridien 2 heures après être passé au-dessus de celui de Greenwich, c'est que nous sommes 30° à son Ouest, notre longitude est donc : 30° W.

Pratique :

LA LONGITUDE A LA MERIDIENNE

1 - Déterminer au sextant l'heure exacte de passage du soleil à votre méridien ;
2 - Chercher dans les éphémérides son heure de passage au méridien 0 ;
3 - Calculer l'écart entre les deux heures obtenues ;.
4 - Convertir cet écart en degrés, minutes, secondes. C'est la longitude G ;
5 - Si l'heure de passage est inférieure à l'heure de culmination, G est Ouest,
si l'heure de passage est supérieure à l'heure de culmination, G est Est.

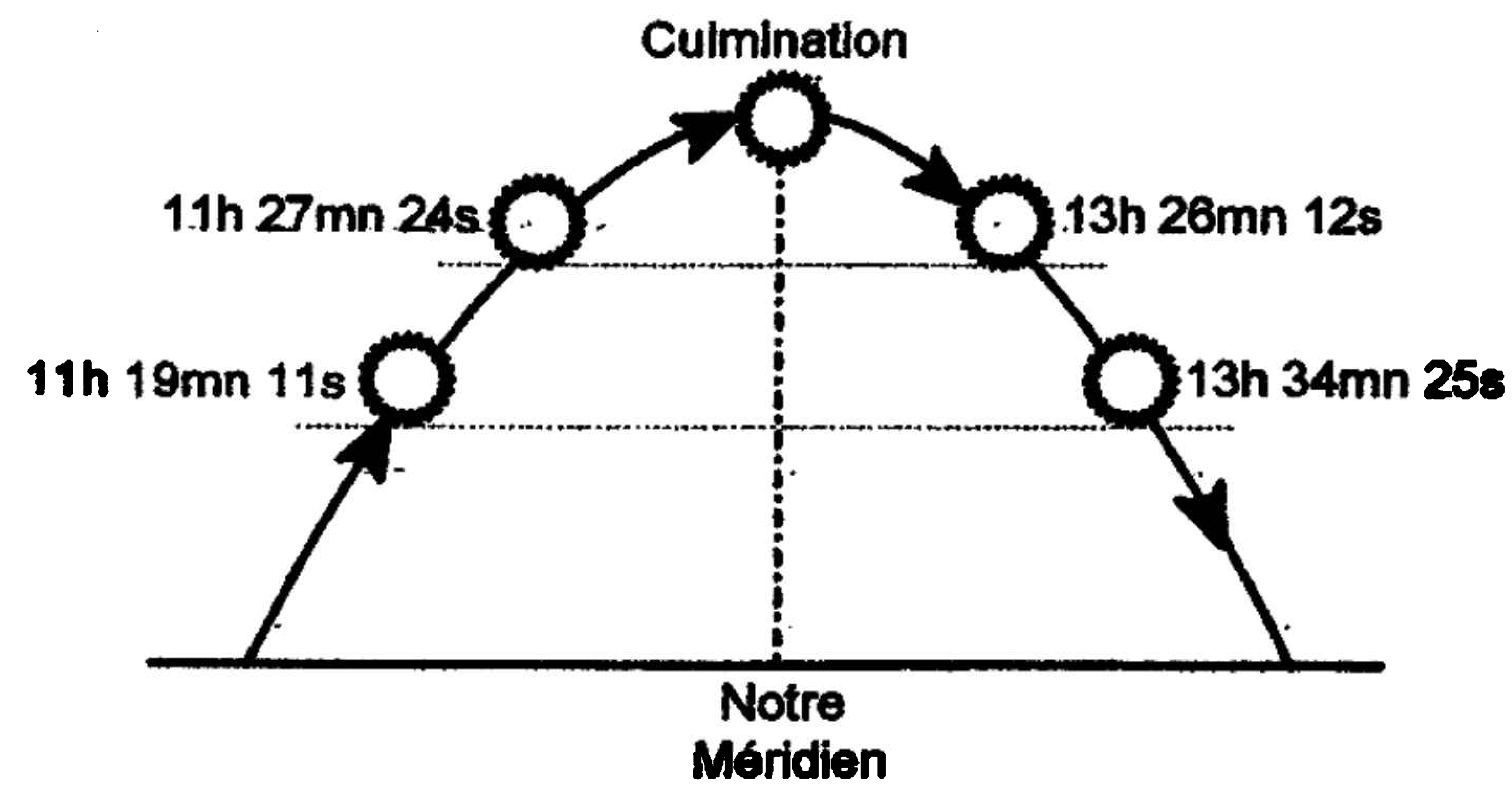
Remarque :

Dans le cas de la longitude, c'est la détermination de l'heure exacte de la culmination qui est primordiale. Si l'on se contentait de noter l'heure où le Soleil paraît être le plus haut au-dessus de l'horizon (comme pour la latitude), cette mesure serait extrêmement imprécise : en effet, on remarque que le Soleil semble se stabiliser pendant quelques minutes à son maximum avant de redescendre (en fait il n'en est rien, mais ses mouvements sont alors imperceptibles), et chaque erreur de 1 seconde induit un décalage de ¼ de mille en position.
En pratique, la solution consiste à faire une ou plusieurs mesures de la hauteur du Soleil environ une heure avant l'heure prévue de la culmination, en notant soigneusement pour chacune d'elles la hauteur mesurée et l'heure de la mesure ; puis, après le passage du Soleil au méridien, de recaler le sextant successivement sur les différentes hauteurs mesurées, et d'attendre que le Soleil revienne à ces hauteurs successives, en redescendant. On note alors avec précision la deuxième heure de chaque hauteur. Il suffit ensuite de calculer la moyenne de toutes ces heures pour obtenir le moment de la culmination.

Pour les mêmes raisons, il est inutile de corriger les hauteurs mesurées au sextant (erreurs instrumentale et de visée). En effet celles-ci n'ont pas d'importance en elles-mêmes et leur valeurs n'interviennent pas dans ce calcul particulier. Ici, seul le temps nous intéresse et doit être mesuré avec précision.

Exemple :

Le 16 février 1997,
1ère mesure à 11h 19mn 11s TU,
2ème mesure à 11h 27mn 24s TU,
3ème mesure à 13h 26mn 12s TU,
4ème mesure à 13h 34mn 25s TU.



L'heure de passage du Soleil au méridien de Greenwich est indiquée dans les éphémérides pour chaque jour sans aucun calcul :

Pour le 16/02/97 : Colonne T.Pass. : 12h 14mn 06s

Touches	Affichage	Explications
11 °'" 19 °'" 11 °'" +	***11.31972222***	
11 °'" 27 °'" 24 °'" +	***22.77638889***	
13 °'" 26 °'" 12 °'" +	***36.21305555***	
13 °'" 34 °'" 25 °'" =	***49.78666666***	Total des heures en décimal
÷		divisé par
4	***4***	le nombre d'observations
=	***12.44666667***	égale heure culmination
°'"←	***12° 26° 48.***	convertie en sexa. (facultatif)
−		moins
12 °'" 14 °'" 6 °'"	***12.235***	T. Pass en décimal
=	***0.211666665***	égale écart entre les 2 heures
×		multiplié par
15	***15***	15° (variation horaire)
=	***3.174999975***	égale long. en degrés décim.
°'"←	***3° 10° 30***	convertie en sexagésimal.

Le Soleil est passé à Greenwich (à 12h 14mn 6s) avant de passer "chez nous" (à 12h 26mn 48s) ⇨ longitude W

→ G = 3° 10' 30" W

Chapitre 4 : Etoiles, Lune et Planètes

Le soleil est bien sûr l'astre le plus visible et le plus identifiable de notre ciel, mais il n'est pas le seul. Quelques étoiles, la lune et certaines planètes sont aussi utilisables en navigation astronomique.

Sans vouloir faire ici un exposé exhaustif de navigation par les astres, il nous est apparu possible, maintenant que les ¾ du chemin sont parcourus, d'en dire quelques mots.

<u>Principes généraux :</u>

En principe, il n'y a pas de méridienne d'étoiles, de lune ou de planètes. On ne fera ici que des droites de hauteur.

Tout ce qui a été dit pour la théorie de la droite de hauteur de soleil est applicable à tous les astres, c'est dire que les principes et les calculs sont exactement les mêmes, et les 2 programmes de la page 18 sont donc utilisables sans aucune modification.
Les seules différences portent sur :

- la valeur de l'angle horaire et de la déclinaison qui changent bien sûr pour chacun des astres observés.
- la correction à apporter à la hauteur mesurée pour obtenir la hauteur vraie Hv qui varie aussi selon l'astre observé. Par contre l'erreur instrumentale -collimation- s'évalue de la même façon que pour le soleil (cf. page 10).

Nous nous contenterons donc ci-après de vous indiquer où trouver et comment calculer ces éléments pour chaque astre.

Les éphémérides de ces autres astres ne se trouvent pas aussi fréquemment que celles du soleil. Le "Livre de Bord" de Bloc Marine contient celles des étoiles, mais pas des planètes ni de la lune. Seules les éphémérides annuelles du Bureau des Longitudes les contiennent toutes. Ce seront donc elles que nous utiliserons en exemple.

<u>Les étoiles :</u>

En raison de leur gigantesque éloignement, le mouvement des étoiles est imperceptible. Elles paraissent comme fixées dans le ciel, sans mouvement les unes par rapport aux autres. Leur seul mouvement apparent est donc en fait celui de la terre qui tourne au milieu d'elles.
Pour simplifier leur positionnement, on a donc choisi de toutes les situer sur la voute céleste par leur Angle Horaire (appelé ici "**Ascension Verse**") par rapport à un point fixe appelé Point Vernal ou point γ (point gamma), et leur Déclinaison par rapport au plan de l'équateur céleste, confondu avec le nôtre.

Les positions de 80 étoiles sont données par les éphémérides. Ce sont les plus visibles et les plus facilement reconnaissables. Bien sûr, on n'en voit que la moitié environ, les autres sont

dans l'autre hémisphère. Les positions de toutes ces étoiles, Ascension Verse et Déclinaison, n'occupent que 4 pages des éphémérides. C'est dire qu'elles ne changent pas beaucoup ! En fait, elles ne sont pas données toutes les heures, mais seulement tous les 2 mois !
Pour chaque étoile, les valeurs sont données d'une part pour les degrés (qui ne changent pas), et d'autre part pour les minutes qui changent (un peu) tous les 2 mois.

Le calcul consiste donc à déterminer l'angle horaire à Greenwich du Point Vernal (AHso) et à y ajouter l'Ascension verse de l'étoile choisie.
Le Point Vernal parcourt 361° en 24H, soit 15° 2,5' (15.042° décimaux) à l'heure.

L'angle horaire AHao d'une étoile se calcule donc ainsi :

AHao = AHso point γ + Asc. Verse ° + Asc. Verse '
(l'extrapolation pour les minutes se faisant "à vue")

Et la déclinaison D se lit tout simplement :

D = D° + D'   Déclinaison négative si Sud
(l'extrapolation pour les minutes se faisant "à vue")

Les deux corrections à apporter à la valeur de Hi sont indiquées dans la table VIII des éphémérides.

Les planètes :

Seules Vénus, Mars, Jupiter et Saturne sont visibles au sextant. Leur valeur d'angle horaire et de déclinaison sont données pour chaque heure, et leur variation respective *v* et *d* sont indiquées en bas de chaque colonne.

Les deux corrections à apporter à la valeur de Hi sont indiquées dans la table VIII.

La lune :

La lune a des mouvements tellement irréguliers que des corrections à la variation "normale" sont données pour chaque heure, tant en angle horaire qu'en déclinaison, à droite de la colonne concernée :

- l'angle horaire AHao varie de 14°19' + *v* par heure (*v* à droite de AHao)
- la déclinaison varie de *d* par heure (*d* à droite de D)

Les deux corrections à apporter à la valeur de Hi sont indiquées dans la table IX.

L'ensemble de ces éléments est résumé dans le tableau au-dessous de la grille générale de calculs (cf. pages 20-21).

NAVIGATION ASTRONOMIQUE

et calculatrices programmables

"Navigation Astronomique et calculatrices programmables" est divisé en deux parties :

• un exposé de la théorie, expliquée à l'aide de nombreux exemples détaillés, destiné à satisfaire la curiosité et le plaisir de ceux qui veulent aussi vraiment comprendre "l'astro".

• un recueil de sept programmes pour calculatrices qui recouvrent tous les aspects de la navigation astronomique : éphémérides complets de soleil jusqu'en 2100, droite de hauteur de soleil et d'étoiles, méridienne… Tous ces programmes sont expliqués en détail pour permettre à l'utilisateur de comprendre leur logique et de pouvoir les modifier à sa guise, s'il le souhaite.

L'ensemble constitue un outil éminemment pratique permettant à tous de découvrir et de mettre sans peine en application cette science fascinante qu'est la Navigation Astronomique.

Les exemples et les programmes sont écrits pour des calculatrices CASIO fx-180p et fx-6910aG, mais très facilement adaptables à toute autre machine de caractéristiques au moins équivalentes.

Deneb Éditions - 11, rue des Acacias - 31830 Plaisance-du-Touch

ISBN 2-9512270-0-6